Черные дыры и структура пространства-времени

Хуан Малдасена

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

Черные дыры — самые загадочные космические объекты из числа предсказываемых общей теорией относительности. В этой обзорной статье мы остановимся на некоторых интересных свойствах классических черных дыр. Если дополнить общую теорию относительности квантово-механическими представлениями, черные дыры перестают быть абсолютно черными. На самом деле, они испускают тепловое излучение. Существование этого теплового излучения приводит к ряду парадоксов. Если же использовать дополнительно еще и теорию струн в качестве квантовой теории гравитации, часть парадоксов разрешается. Это приводит к некоторым интересным изменениям в нашем концептуальном понимании пространства-времени.

- Черные дыры и структура пространства-времени
  - ○
  - ○
  - ○ Черные дыры и структура пространства-времени
  - ○ 1. Черные дыры
- 2. Черные дыры и квантовая механика
  - ○
  - ○ 2.1. Энтропия черных дыр
  - ○ 2.2. Информационный парадокс
- 3. Разрешение загадок
  - ○ 3.1. Теория струн
  - ○ 3.2. Чёрные дыры в рамках теории струн
- 4. Структура пространства-времени
  - ○

Черные дыры и структура пространства-времени

Хуан Малдасена (Juan Maldacena),
Институт высших исследований,
Школа естественных наук,
Принстон, Нью-Джерси, США

Черные дыры и структура пространства-времени

1. Черные дыры
2. Черные дыры и квантовая механика
3. Разрешение загадок
4. Структура пространства-времени

1. Черные дыры

Черные дыры — один из самых необыкновенных объектов, предсказываемых общей теорией относительности Эйнштейна. У черных дыр интересная история, поскольку они преподнесли теоретикам немало сюрпризов, приведших к лучшему пониманию природы пространства-времени.

Давайте начнем с теории всемирного тяготения Ньютона. Силу гравитационного притяжения мы испытываем прямо здесь, на поверхности земли. Если подбросить камень, он упадет под действием земного притяжения. А можно ли подбросить камень с такой скоростью, чтобы он на Землю не вернулся? Можно. Если запустить камень со скоростью выше второй космической скорости (около 11 км/с), он покинет гравитационное поле Земли. Эта «скорость выхода» зависит от массы и радиуса земного шара. Если бы Земля при ее нынешнем радиусе была массивнее или имела бы меньший радиус при ее нынешней массе, скорость выхода была бы выше. Возникает вопрос: что будет, если плотность и масса космического тела настолько велики, что скорость выхода из его гравитационного поля выше скорости света? Ответ: такое тело будет представляться внешнему наблюдателю абсолютно черным, поскольку свет его покинуть не может. Например, звезда с радиусом меньше, чем

$$R_{b.h.} = \frac{2G_N M}{c^2}$$

где G_N — постоянная Ньютона, а c — скорость света в вакууме, будет выглядеть абсолютно черной.

Для тех, кто не разбирается в формулах, приведу несколько примеров. Чтобы тело, масса которого равна массе Земли, превратилось в черную дыру, оно должно иметь радиус меньше сантиметра. Тело с массой Солнца должно сжаться до диаметра меньше километра. На это еще в конце XVIII века указал Пьер-Симон Лаплас, но тогда никто не придал этому особого значения.

С появлением в 1905 году специальной теории относительности у нас появилось понимание того факта, что скорость света в вакууме — не рядовая скорость. Это космический

предел: ничто не может двигаться быстрее света. Теория относительности Эйнштейна также учит нас, что пространство и время тесно взаимосвязаны. Для наблюдателей, движущихся друг относительно друга, время течет с разной скоростью. Предположим, вы стоите на улице и смотрите на проезжающие машины. Для водителей машин время течет чуть медленнее, чем для вас, и несколько иначе. Предположим, вы видите, как два светофора в разных концах улицы одновременно переключаются на красный. Для водителей же они переключатся не одновременно. Это получается после того, как мы учтем время, которое требуется свету, чтобы пройти расстояние от светофора до наблюдателей. И для вас, и для водителей свет движется с одинаковой скоростью, но время для них течет медленнее. То есть, время относительно, а скорость света абсолютна. Это противоречит нашим интуитивным представлениям о мире, так как эффект этот на нас практически не сказывается, поскольку мы обычно путешествуем на скоростях, которые очень далеки от скорости света, а время измеряем не с абсолютной точностью. Однако в ускорителях элементарных частиц этот эффект наблюдается постоянно. При скоростях, близких к скорости света, частицы живут значительно дольше.

Пространство и время объединяются в единую концепцию пространства-времени. Время воспринимается по-разному двумя наблюдателями, движущимися друг относительно друга. Однако оба наблюдателя воспринимают одно и то же пространство-время. Имеются точные формулы, позволяющие нам связать наблюдения этих двух наблюдателей.

Теперь вернемся к гравитации. Она обладает очень важным свойством, которое открыл еще Галилей: все тела падают одинаково, если не учитывать сопротивление воздуха. В безвоздушном пространстве пушинка и камень упадут на землю одновременно. В случае действия других сил это не так. В электрическом поле заряженная частица будет двигаться иначе в случае изменения ее массы или заряда. В теории всемирного тяготения Ньютона причина, по которой все тела движутся под воздействием гравитационных сил одинаково, сводится к тому, что сила гравитационного притяжения пропорциональна массе тела. Иногда это называют «принципом эквивалентности».

Эйнштейн осознал, что теория Ньютона противоречит теории относительности, поскольку согласно ньютоновской теории гравитационное взаимодействие между телами передается

мгновенно. В 1915 году Эйнштейн решил эту проблему таким образом, что из этого решения естественным путем вытекает и принцип эквивалентности. Свою новую концепцию Эйнштейн назвал общей теорией относительности. Он предположил, что гравитация возникает вследствие искривления пространства-времени. В искривленном пространстве-времени частицы движутся по кратчайшим траекториям. Изначально параллельные линии таких траекторий в искривленном пространстве-времени могут сближаться. Например, два земных меридиана на пересечении с экватором параллельны, однако по мере удаления от него они сближаются и, в конечном итоге, пересекаются в точке Северного полюса. Конфигурация пространства-времени зависит от материи, перемещающейся в нем. Общая теория относительности подразумевает, что темп времени зависит от гравитационного поля. Следовательно, два жильца одного дома, обитающие на первом и последнем этажах, воспринимают ход времени по-разному. Для обитателя первого этажа время течет чуть медленнее, чем для обитателя верхнего этажа. Для земных зданий этот эффект пренебрежимо мал и составляет порядка 10^{-15} секунды за секунду. Главное, что нам нужно усвоить, это то, что массивные тела стягивают пространство-время на себя. В частности, вблизи массивных объектов время течет медленнее, чем на удалении от них.

Физики всегда стремятся сначала разобрать простейшие ситуации. Поэтому в 1916 году, вскоре после открытия общей теории относительности, молодой немецкий физик Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschield) нашел простейшее сферически симметричное решение уравнений Эйнштейна. Это решения описывает частный случай искривления геометрии пространства-времени под воздействием точечной массы. Однако, вместо геометрии, давайте обратим внимание на другой их аспект: темп хода стационарных часов. Часы на поверхности Солнца идут на одну миллионную медленнее, чем удаленные от Солнца часы. Часы на поверхности нейтронной звезды идут со скоростью 70% от скорости часов вдали от нее. Здесь налицо уже весьма значительный эффект расхождения во времени. Так вот, решение Шварцшильда подразумевает, что часы в «центре» точечной массы вообще остановились бы. Поначалу физики сочли это «нефизическим» парадоксом, следствием слишком упрощенного анализа.

Дальнейшие расчеты показали, однако, что речь в решении Шварцшильда идет даже не о некоем условном «центре», а о

целой идеальной сфере. Путешественник, пересекающий границы этой сферы и попадающий внутрь нее, не испытывает ничего странного или необычного — для него время течет по-прежнему. А вот для сторонних наблюдателей за пределами этой сферы, принимающих сигналы от падающего внутрь сферы путешественника, любые сигналы от него будут неуклонно замедляться, пока не исчезнут, как таковые, при пересечении им поверхности сферы. Поверхность, на которой стационарные часы замедляются до нуля, принято называть сферой Шварцшильда или «горизонтом». Возврата из-за горизонта нет. Наблюдатель, пересекший его и попавший внутрь сферы, обратно не выберется и будет неизбежно поглощен сингулярностью в ее центре. «Сингулярность» — это область сверхвысокого искривления пространства-времени, и путешественник в ней попросту исчезнет и будет раздавлен огромной гравитационной силой. Выясняется, что размер черной дыры согласно теории Эйнштейна описывается все той же формулой, предложенной еще Лапласом в рамках механики Ньютона, однако ее физическая интерпретация в корне меняется.

Черные дыры могут образовываться в результате астрофизических процессов, когда у звезд с массой, на порядок превышающей массу Солнца, кончается термоядерное топливо, и они обрушиваются внутрь себя под действием гравитационных сил. Имеется достаточно данных наблюдений, свидетельствующих о реальности существования таких черных дыр во Вселенной. С астрофизической точки зрения обнаруженные черные дыры подразделяются на две категории. Первый тип — это черные дыры, образовавшиеся в результате коллапса массивных звезд и обладающие соответствующей массой. Поскольку черные дыры кажутся нам реально черными, наблюдать их крайне сложно. Если посчастливится, мы можем увидеть лишь шлейф газа, затягиваемого в черную дыру. Разгоняясь при падении, газ разогревается и испускает характерное излучение, которое мы только и можем обнаружить. Источником газа при этом является другая звезда, образующая парную систему с черной дырой и обращающаяся вместе с ней вокруг центра масс двойной звездной системы. Иными словами, сначала мы имели обычную двойную звезду, затем одна из звезд в результате гравитационного коллапса превратилась в черную дыру. После этого черная дыра начинает засасывать газ с поверхности горячей звезды. Второй тип — это гораздо более массивные черные дыры в центрах галактик. Их масса превышает массу Солнца в миллиарды раз. Опять же, падая на такие черные

дыры, вещество разогревается и испускает характерное излучение, которое со временем доходит до Земли, его-то мы и можем обнаружить. Предполагается, что все крупные галактики, включая нашу, имеют в центре свою черную дыру.

Однако основным предметом нашего разговора является не астрофизика черных дыр, а исследование их влияния на структуру пространства-времени.

Согласно теории Эйнштейна черная дыра представляет собой бездонный провал в пространстве-времени, падение в который необратимо. Что упало, то пропало в черной дыре навеки.

У черных дыр очень интересные свойства. После коллапса звезды в черную дыру ее свойства будут зависеть только от двух параметров: массы и углового момента вращения. То есть, черные дыры представляют собой *универсальные* объекты, то есть, их свойства не зависят от свойств вещества, из которого они образованы. При любом химическом составе вещества исходной звезды свойства черной дыры будут одними и теми же. То есть, черные дыры подчиняются только законам теории гравитации — и никаким иным.

Другое любопытное свойство черных дыр заключается в следующем: предположим, вы наблюдаете процесс, в котором участвует черная дыра. Например, можно рассмотреть процесс столкновения двух черных дыр. В результате из двух черных дыр образуется одна более массивная. Этот процесс может сопровождаться излучением гравитационных волн, и уже построены детекторы с целью их обнаружения и измерения. Процесс этот теоретически просчитать весьма непросто, для этого нужно решить сложную систему дифференциальных уравнений. Однако имеются и простые теоретические результаты. Площадь сферы Шварцшильда получившейся черной дыры всегда больше суммы площадей поверхностей двух исходных черных дыр. То есть, при слиянии черных дыр площадь их поверхности растет быстрее массы. Это так называемая «теорема площадей», она была доказана Стивеном Хокингом (Steven Hawking) в 1970 году.

2. Черные дыры и квантовая механика

Следующий сюрприз ждал ученых, когда они занялись изучением квантовых эффектов. В квантовой механике вакуум — это не просто полное отсутствие элементарных частиц. Вакуум — это весьма интересное состояние пространства, в котором постоянно возникают и тут же аннигилируют пары «частица-античастица». В спрямленном пространстве чистого выхода в виде возникших из вакуума частиц мы не имеем в силу закона сохранения энергии. То есть, фактически, частицы взаимно аннигилируются, даже не успев родиться. В 1974 году всё тот же Стивен Хокинг доказал, что вблизи горизонта это не так. Имеется ненулевая вероятность рождения пары частиц, сразу же оказывающихся по разные стороны бесконечно тонкого горизонта, причем закон сохранения энергии не нарушается, поскольку частица снаружи горизонта обладает, с точки зрения стороннего наблюдателя, положительной энергией, а частица внутри горизонта — отрицательной (при этом с точки зрения наблюдателя внутри сферы Шварцшильда всё выглядит с точностью до наоборот). Тепловое распределение испускаемых частиц соответствует температуре, которая обратно пропорциональна массе черной дыры. Даже для черных дыр звездной массы эта температура настолько близка к абсолютному нулю, что этот эффект зарегистрировать фактически невозможно. Однако, если черная дыра достаточно долго пробыла бы в полном вакууме, то за счёт эффекта Хокинга она постепенно бы теряла массу через излучение рождающихся на поверхности частиц. Теряя массу, черная дыра разогревается. Черная дыра с массой порядка 10^{19} кг (масса большого горного хребта) разогреется до температуры в несколько тысяч градусов и будет выглядеть белой. Однако мощность такого излучения будет составлять не больше милливатта, и зарегистрировать его по-прежнему практически невозможно. Но, чем меньше становится масса изолированной черной дыры, тем выше становится её температура, и тем быстрее она «испаряется», пока, вероятно, не испарится полностью. Фактически, если бы нам удалось сжать до плотности черной дыры всего несколько килограммов вещества (на практике нам этого, конечно, не дано!), такая черная дыра испарилась бы меньше, чем за одну миллисекунду, а энергии при этом выделилось бы больше, чем при взрыве водородной бомбы.

Наличие такого теплового излучения у черных дыр сразу создает две головоломки:

1) причины повышения энтропии черной дыры

и

2) информационный парадокс.

Попробую объяснить их смысл подробнее.

2.1. Энтропия черных дыр

В классической физике тепловые свойства вещества обусловлены движением составляющих его материальных частиц. Например, температура воздуха связана со среднеквадратичной скоростью теплового движения его молекул. Родственное температуре понятие называется энтропия. Энтропия дает количественное выражение степени хаотичности движения составляющих системы. Законы термодинамики позволяют связать энтропию с температурой, массой и объемом, благодаря чему её можно рассчитать, не зная микроскопических деталей строения системы. Хокинг и Бекенштейн (Bekenstein) показали, что энтропия черной дыры пропорциональна площади её горизонта, деленной на квадрат т. н. гравитационной длины Планка $l_{Planck} = 10^{-33}$ см. Для черной дыры макроскопических размеров значение энтропии получается просто чудовищным. Однако законов термодинамики в данном случае, похоже, ничто не отменяет, и они продолжают действовать даже с учетом, по сути, бесконечного «вклада» невидимых недр черной дыры в её энтропию. Результаты эти крайне озадачивают, прежде всего, потому, что совершенно не ясно, из чего «складывается» энтропия черной дыры, поскольку никаких явных компонентов, которые своим хаотичным движением могли бы способствовать беспредельному увеличению энтропии, внутри черной дыры нет. По крайней мере, мы не можем усмотреть их «снаружи», поскольку нам видится только по-настоящему «черная» дыра — бездонный провал в ткани пространства-времени, и чтобы понять, из каких «компонентов» она реально состоит, необходимо найти какие-то самые фундаментальные составные элементы, на которые можно разложить саму геометрию пространства-времени.

Крайне интересно еще и то, что энтропия черной дыры пропорциональна её площади (квадрату радиуса), а не объему (кубу радиуса). В начале 1990-х годов Хофт ('t Hooft) и Зюскинд (Susskind) предположили, что в теории, объединяющей квантовую механику и гравитацию, число элементарных компонентов, необходимых для исчерпывающего описания системы, пропорционально площади окружающей поверхности, в которую она заключена. А это означает, что структура пространства-времени в корне отличается от структуры твёрдого тела, в котором число таких элементарных компонентов (материальных точек или атомов) возрастает пропорционально её объему, а

отнюдь не площади. С практической точки зрения такое ограничение энтропии поверхностью сферы не кажется чересчур принципиальным, однако, с теоретической точки зрения, оно приводит к коренному изменению представлений о мире, поскольку оказывается возможным описать замкнутую пространственно-временную область исключительно по поведению компонентов, расположенных на её внешней границе.

2.2. Информационный парадокс

Мы уже отмечали, что происхождение чёрной дыры может быть различным, однако свойства самой дыры от этого не меняются. Обычно в физике при фазовом переходе или ином преобразовании от исходного состояния вещества зависит и конечное состояние вещества. Иногда различия едва заметны, но они присутствуют. Позвольте привести пример. Возьмём две абсолютно одинаковые тарелки, напишем на одной из них букву А, а на другой — букву Б, после чего разобьём ту и другую на мелкие кусочки. На первый взгляд результат идентичен — две груды мелких осколков на полу. Однако, тщательно изучив обе кучи битого фарфора, мы рано или поздно сумеем разобраться, на какой из исходных тарелок какая буква значилась.

А теперь предположим, что одну из этих тарелок мы бросили в чёрную дыру. Судя по всему, что мы знаем на сегодняшний день, рано или поздно всё вещество этой черной дыры вместе с остатками тарелки испарится в виде излучения Хокинга. Согласно теории Хокинга это будет чисто тепловое излучение, не зависящее от исходного состояния ни самой черной дыры, ни, тем более, попавшей в неё тарелки. То есть, мы, судя по всему, никогда не восстановим информацию о том, какая буква была изначально написана на тарелке.

На первый взгляд это кажется чистой воды академической казуистикой. Мы же постоянно что-то забываем в обычной жизни, и нам это не кажется противоестественным! Однако проблема-то на самом деле крайне серьезна, поскольку квантовая механика утверждает, что законы, управляющие этим процессом, таковы, что подобная информация должна быть *в принципе* восстановима. Поэтому решение проблемы сохранения информации является необходимостью с точки зрения построения последовательной и внутренне непротиворечивой квантовой теории гравитации. Информационный парадокс обязан быть разрешен в рамках такой теории.

Многие видные физики, включая С. Хокинга, полагали, что это невозможно. Они считали, что всякая информация внутри черной дыры уничтожается бесследно, и, как следствие, предлагали отказаться и от идеи Великого объединения теории взаимодействий в рамках квантово-механических представлений,

и от квантовой механики, как таковой, поскольку она постулирует невыполнимый принцип сохранения информации.

Однако дальнейшее осмысление этого вопроса привело к интересным последствиям, а именно, к развитию теории струн в физике элементарных частиц.

3. Разрешение загадок

3.1. Теория струн

Квантовая механика и гравитационная теория в рамках общей теории относительности вообще уживаются между собой крайне плохо. С практической точки зрения нам в повседневной жизни квантовая теория гравитационного взаимодействия, по большому счёту, не нужна, поскольку все явления, с которыми мы прямо или косвенно сталкиваемся, описываются либо гравитационными эффектами, на фоне которых квантово-механические эффекты никак не проявляются, либо наоборот. С другой стороны, если нас интересует происхождение Вселенной и процессы, происходившие в первые мгновения после Большого Взрыва, универсальная и непротиворечивая теория нам всё-таки нужна. В самом начале квантово-механические и гравитационные взаимодействия были в равной мере значимы. Именно это и послужило одной из главных мотивировок к разработке квантовой теории гравитации.

Такой теорией стала теория струн. В её рамках удалось, наконец, объединить квантово-механические и гравитационные взаимодействия. Мы не знаем, верна ли эта теория, но лучшей кандидатуры на роль универсальной теории на сегодня не существует. Происхождение названия «теория струн» в рамках нашего обсуждения не столь уж и важно. Главное для нас — уяснить, что это квантовая теория гравитации.

3.2. Чёрные дыры в рамках теории струн

В рамках теории струн можно исследовать внутреннее строение черных дыр. В особых случаях можно даже составить описание микроструктуры черной дыры. По техническим причинам проще всего понять устройство черных дыр, живущих в пространственно-временном континууме постоянной отрицательной кривизны. Такие пространственно-временные континуумы представляют собой простейшее обобщение обычного спрямленного пространства. Кривизна спрямленного пространства равна нулю, и его двумерным аналогом является плоскость. Двумерным аналогом пространства с положительной кривизной является поверхность сферы. Двумерная модель («карта») гиперболического пространства с отрицательной кривизной представлена на рисунке 1. Аналогичным образом можно представить себе и пространственно-временные континуумы, обладающие нулевой, положительной или отрицательной кривизной. Пространственно-временные континуумы с отрицательной кривизной, по сути, имеют замкнутую границу в бесконечности. Частица может достигнуть бесконечно удаленной границы и вернуться обратно за конечное время, и это действительно возможно, но лишь по причине неоднородности течения времени — его ход убыстряется по мере удаления от исходной точки.

В 1997 году я рискнул предположить, что все гравитационные физические взаимодействия в таком пространстве можно описать через теорию взаимодействия обычных частиц, расположенных на его границе. В дальнейшем эта гипотеза была детально разработана С. Габсером (S. Gubser), И. Клебановым, А. Поляковым, Э. Виттеном (E. Witten) и многими другими учеными. Детали этой теории довольно сложны, однако её ключевой момент состоит в следующем: теория гравитации, глубинной динамики которой мы до конца не понимаем, сводится к теории взаимодействия обычных частиц на поверхности сферы, которую мы, как раз, понимаем. Еще важнее то, что такая пограничная теория гравитации подчиняется принципам квантовой механики.

Термодинамическое состояние черной дыры в рамках этой модели описывается исключительно температурой частиц в её граничном слое. Соответственно, и энтропия чёрной дыры равняется лишь суммарной энтропии этих частиц. Сами же

пограничные частицы как раз и являются «элементарными квантами» пространственно-временной геометрии.

Рисунок Морица Эшера ');return false;" target="_blank">

Рисунок 1. *На рисунке Эшера представлена попытка воспроизвести геометрию гиперболического пространства. Показана его проекция на диск. Все изображенные фигуры геометрически конгруэнтны между собой, то есть, в исходном гиперболическом пространстве их геометрические размеры равны, однако из-за искажающего эффекта его проекции на диск, они кажутся уменьшающимися по мере приближения к краю диска. На самом же деле граница диска равноудалена на бесконечное расстояние от любой точки внутри диска. Аналогичное искажение мы наблюдаем на географических картах в стандартной планиметрической проекции. Приполярные области кажутся непропорционально увеличенными. В этой проекции гиперболического пространства мы наблюдаем противоположный эффект. Размеры гиперболического пространства бесконечны, однако на рисунке оно выглядит конечным, поскольку область около обода показана в многократно уменьшенном масштабе.*

4. Структура пространства-времени

Все эти идеи глубоко затрагивают наши представления о структуре пространства-времени. Обратите внимание, что начали мы с теории поведения частиц на сферической плоскости, ограничивающей черную дыру, то есть имели дело с $2+1$ пространственно-временными измерениями, а закончили теорией гравитации для $3+1$ измерений. Получается, что одно пространственное измерение взялось буквально ниоткуда! Однако оно взялось не из неоткуда, а из взаимодействий между частицами в $2+1$ измерениях.

А это значит, что пространство-время — не самое фундаментальное понятие. Оно порождается более фундаментальными понятиями, и его законы вступают в силу лишь после некоторого удаления наблюдателя от объекта изучения. Позвольте привести аналогию. Предположим, мы наблюдаем поверхность озера. Мы видим волны, мы видим жуков-плавунцов, бегающих по поверхности воды и т. п. Поверхность озера представляется нам ясной и вполне описываемой. Действительно, мы даже можем написать уравнения, описывающие распространение волн, силы поверхностного натяжения и т. д. Теперь, предположим, нам захотелось изучить структуру поверхности воды более пристально. Под микроскопом мы увидим, что поверхность воды наблюдается не столь отчетливо, как раньше. А уж если мы посмотрим на неё в электронный микроскоп, то мы и вовсе увидим, как с поверхности воды беспрестанно срываются испаряющиеся молекулы, а их место занимают конденсирующиеся молекулы воды из воздуха, и поймём, что граница между водой и воздухом носит чисто условный характер, поскольку точно определить её местоположение невозможно. При ближайшем рассмотрении оказывается, что мы недостаточно чётко дали определение поверхности воды, что нужно, оказывается, каким-то образом включить в него явления, происходящие на уровне отдельных молекул. В точности так же и определение пространства-времени при рассмотрении последнего в самых микроскопических масштабах утрачивает былую определенность. И выясняется, что на этом уровне главной является концепция слоя пограничных частиц, а само пространство-время — суть проявление их совокупных свойств.

Если бы мы только жили в пространстве-времени с отрицательной кривизной, то для понимания всего происходящего в нашей Вселенной достаточно было бы создать адекватную теорию пограничного слоя, описывающую поведение частиц в нём...

Интересно, однако, что, судя по всем имеющимся данным, в макроскопических масштабах пространство-время нашей Вселенной имеет, увы, положительную кривизну. На текущий момент нам неизвестно, существует ли возможность для подобного описания гравитационных полей в пространстве-времени с положительной кривизной. Такое описание, если бы оно существовало и если бы нам удалось его найти, решило бы проблему сингулярности Большого взрыва.